DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160970

魏莎, 柏兆海, 吴迪梅, 江荣风, 夏立江, 马林. 北京"土壤-饲料-奶牛"系统氮磷流动及环境损失时空特征[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(3): 316−327

Wei S, Bai Z H, Wu D M, Jiang R F, Xia L J, Ma L. Temporal and spatial characteristics of nitrogen and phosphorus cycling and environmental losses in the "soil-feed-dairy" production system in Beijing[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(3): 316−327

北京"土壤-饲料-奶牛"系统氮磷流动及环境损失时空特征*

魏 莎[1,2], 柏兆海[2], 吴迪梅[3], 江荣风[1], 夏立江[1], 马 林[2**]

(1. 植物-土壤相互作用教育部重点实验室/中国农业大学资源与环境学院 北京 100193; 2. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中国科学院农业水资源重点实验室/河北省节水农业重点实验室 石家庄 050022; 3. 北京市畜牧业环境监测站 北京 100083)

摘 要: 分析大城市郊区"土壤-饲料-奶牛"养殖体系养分流动和环境排放特征是合理控制养殖规模、促进农牧结合、保护生态环境和保障畜禽产品供应等政策制定的基础。本研究选取北京市郊区 28 个规模化奶牛农场, 调研包括饲料来源和投入、奶牛生产和粪尿管理以及产品输出情况。结合公开发表的文献数据和北京市统计数据, 利用 NUFER-animal 模型对 1980—2013 年北京市规模化奶牛农场"土壤-饲料-奶牛"生产系统养分流动特征、利用效率和环境损失的时空变化进行了定量化分析。结果表明, 1980—2013 年, 奶牛个体尺度(仅包括泌乳牛)氮利用效率从 14.9%增加到 21.2%, 磷利用效率从 13.8%增加到 27.3%; 群体尺度(包括犊牛、育成牛、青年牛、泌乳牛和干乳牛)氮利用效率从 14.5%增加到 18.2%, 磷利用效率从 15.8%增加到 24.9%; 系统尺度(土壤-饲料-奶牛)氮利用效率从 11.3%增加到 15.8%, 磷利用效率从 13.3%增加到 22.3%。北京市奶牛养殖个体尺度、群体尺度和系统尺度氮利用效率在 1985 年前减少; 而 1985 年后逐渐增加。个体尺度、群体尺度和系统尺度磷利用效率均不断增加。系统尺度氮总损失从 1980 年的 1 516 t 增加到 2013 年的 16 973 t; 磷总损失从 114 t 增加到 1 763 t。生产 1 kg 氮磷产品造成的氮和磷损失均表现出不断减少的趋势。北京市"土壤-饲料-奶牛"生产系统氮磷流动特征发生了很大变化, 养分利用效率和总环境损失不断增加。产生这一变化的原因是养殖数量的增加、养殖模式从传统向集约化转变和环保管理措施的完善。因此, 调整奶牛养殖从数量型向质量型转变以及提高喂养技术和粪尿管理水平等是提高都市奶牛养殖可持续发展的必要措施。

关键词: "土壤-饲料-奶牛"生产系统; 养分利用效率; 氮损失; 磷损失; NUFER 模型
中图分类号: X171.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)03-0316-12

Temporal and spatial characteristics of nitrogen and phosphorus cycling and environmental losses in the "soil-feed-dairy" production system in Beijing*

WEI Sha[1,2], BAI Zhaohai[2], WU Dimei[3], JIANG Rongfeng[1], XIA Lijiang[1], MA Lin[2**]

(1. Key Laboratory of Plant-Soil Interactions, Ministry of Education / College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences / Hebei Key Laboratory of Water-

---

* 科技部国家国际科技合作专项项目(2015DFG91990)、国家自然科学基金面上项目(31572210)、中国科学院重点部署项目(ZDRW-ZS-2016-5)和中国科学院"百人计划"项目资助
** 通讯作者: 马林, 研究方向为养分资源综合管理。E-mail: malin1979@sjziam.ac.cn
魏莎, 研究方向为养分管理和环境可持续性研究。E-mail: weisha_666@126.com
收稿日期: 2016-09-05 接受日期: 2016-10-13

* Supported by the National Science and Technology Cooperation Project of Ministry of Science and Technology of China (2015DFG91990), the National Natural Science Foundation of China (31572210), the Key Research Program of the Chinese Academy of Sciences (ZDRW-ZS-2016-5) and the "Hundred Talents Program" of Chinese Academy of Sciences
** Corresponding author, E-mail: malin1979@sjziam.ac.cn
Received Sep. 5, 2016; accepted Oct. 13, 2016

Saving Agriculture / Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China; 3. Beijing Environmental Monitoring Station of Animal Husbandry, Beijing 100083, China)

Abstract: With the increasing of urbanization rate and income, the food demand and food consumption structure has been changed greatly in China, especially for the dairy products. However, the environmental risk of livestock production is also growing quickly under the rapid increase of dairy population and intensification rate. Currently, dairy production is mainly concentrated around the peri-urban area in the big cities on the purpose of access to the market. However, there is little information about the nutrient flow and losses of peri-urban dairy production yet. Increasing understanding of this information is useful for policy makers to regulate the size and location of dairy production, and to achieve a crop-dairy integrated and environmental friendly dairy production system. Here, the performance of nitrogen (N) and phosphorus (P) flow, use efficiency and losses of peri-urban dairy farms in Beijing was assessed, using data of a comprehensive survey conducted on 28 dairy farms during 2012–2013 and calculations with the NUtrient flows in Food chains, Environment and Resources (NUFER) model. The feed formula and feed intake, feeding days and other parameters of the production system were derived from survey data for the year 2012 and 2013, and were derived from NUFER model for the period of 1980–2011. Our results showed that, nitrogen use efficiency (NUE) at the animal level (only lactating dairy cow) increased from 14.9% to 21.2% from 1980 to 2013, and phosphorus use efficiency (PUE) increased from 13.8% to 27.3% during the same period. At the herd level (including calves, breed cows, heifers and dry cows), NUE increased from 14.5% to 18.2%, and PUE increased from 15.8% to 24.9% for the past 33 years. Similarly, both the NUE and PUE increased at the system level (soil-feed-cow chain) during the period of 1980–2013, e.g., NUE increased from 11.3% to 15.8%, and PUE increased from 13.3% to 22.3%. NUE was decreased from 1980 to 1985 at all the three production level, however, steadily increased since 1985. Differed with that of NUE, PUE was steadily increased at all the three production level from 1980. The total nitrogen losses increased from 1 516 t N in 1980 to 16 973 t N in 2013, and the total phosphorus losses increased by 1 649 t P, from 114 t P to 1 763 t P during the same period. The average N or P losses to produce 1 kg N or P in products decreased greatly since 1980. In conclusion, the characteristics of N and P flow thorough the "soil-feed-dairy" production system have been greatly changed in Beijing. The nutrient use efficiency and total environmental losses are increasing. The reasons for these changes are the increasing of animal number, the transformation from the traditional to the intensive farming and the improvement of the environmental management measures. Therefore, it is necessary to improve the sustainable development of urban dairy farming by the adjustment of dairy production from quantity to quality, precision feeding technology, and waste management.
Keywords: "Soil-feed-dairy" production system; Nutrient use efficiency; Nitrogen loss; Phosphorus loss; NUFER model

随着规模化畜牧业的发展，畜禽粪尿污染问题已成为世界关注的焦点[1-4]。畜禽粪尿中氮磷可通过氨(NH_3)、氧化亚氮(N_2O)等气体排放到空气或通过其他形态淋洗、径流和土壤侵蚀等方式流失到水体[5-7]，成为重要的 PM 2.5、温室气体排放和面源污染源。Wang 等[7-8]在中国尺度上分析了畜牧业动物产品和粪尿氮磷输入输出情况，但缺乏对粪尿中氮磷在畜牧业生产整体链条中的流动和损失特征分析[7-8]。Ma 等[6]采用物质流的方法建立了食物链养分流动模型(NUFER 模型)，阐明了养分在农田、畜牧、食品加工和家庭消费过程中的利用效率和损失情况，为畜牧业养分流动提供了更为完善的分析方法。随后，柏兆海[5]基于 NUFER 模型建立了 NUFER-animal 模型，在全国尺度对不同动物不同生产系统的养分利用和损失进行了深入研究。前人研究表明在我国全国尺度上，单位耕地面积氮磷排放量较高的区域主要集中在大城市周边[9]，然而现阶段尚缺乏针对都市畜禽养殖体系养分利用特征和环境损失的研究。奶牛作为《北京市种业发展规划(2010—2015)》中的 16 个重要优势品种之一，对奶牛在都市圈环境下养分利用特征和环境损失的研究需求更加迫切[10]。本研究采用物质流动分析法，利用 NUFER-animal 模型定量北京市 1980—2013 年"土壤-饲料-奶牛"生产系统氮磷循环、利用效率和环境排放的时空变化特征，为探索都市圈"土壤-饲料-畜牧业"系统养分循环和减排策略、优化畜禽养殖布局提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　研究区域概况

北京作为中国的首都，是世界 50 大都市之一。位于欧亚大陆的东部边缘，中国华北平原的北端(39°28′N~41°5′N，115°25′E~117°30′E)。总面积 1.68 万 km^2，地势西北高，东南低。郊区(门头沟、房山、通州、顺义、昌平、大兴、怀柔、平谷、密云和延庆)土地总面积 1.52 万 km^2，其中耕地 2 209 km^2，郊区耕地面积占北京市总耕地面积的 95%。北京市人均耕地面积 0.01 hm^2，显著低于华北地区人均耕地面积 0.093 hm^2 和全国平均水平的 0.18 hm^2，耕

地资源明显不足。北京市奶牛养殖数量从 1980 年的 2.0 万头增加到 2013 年的 15.1 万头[11-12]。奶牛养殖结构从传统养殖模式向规模化养殖模式快速转变，规模化比例从 1980 年的无增加到 2013 年的 72.0%[13-14]。

1.2 NUFER 模型介绍和系统边界

NUFER 模型是中国国家和区域尺度食物链系统氮磷流动模型，模型可以模拟"土壤-作物生产-畜禽生产-家庭消费"系统氮磷流动和利用效率，NH_3、N_2、N_2O 挥发，氮磷淋溶和径流损失[6]；NUFER-animal 模型在此基础上可以深入分析主要畜禽品种(奶牛、肉牛、蛋鸡、肉鸡和生猪)、不同养殖模式(传统、放牧、专业养殖户、养殖小区和规模化养殖场)的资源需求、氮磷养分利用及环境损失途径等[15]。

本研究利用 NUFER-animal 模型分析北京奶牛生产"土壤-饲料-奶牛"生产系统氮磷养分流动、利用效率和环境损失情况。本研究基于 3 个尺度，分别为个体尺度、群体尺度和系统尺度。其中，个体尺度仅考虑泌乳牛个体的养分输入和输出。群体尺度则是在泌乳牛个体尺度基础上考虑犊牛、育成牛、青年牛和干乳牛养分输入及输出。系统尺度是在群体尺度的基础上考虑"土壤-饲料-奶牛"管理体系，包括饲料生产、粪尿储藏、还田利用等环节养分输出及输入平衡。不同尺度的边界和养分流动如图 1 所示。

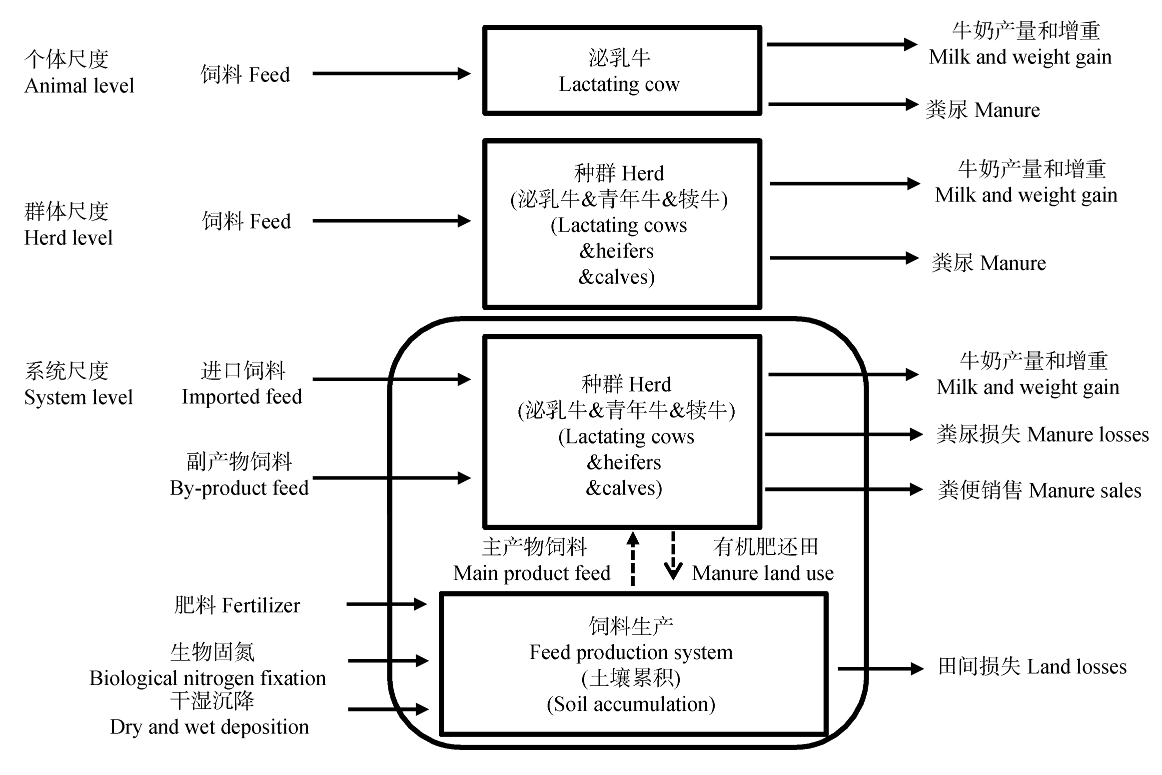


图 1 奶牛养殖体系不同尺度系统边界和养分流动图

Fig. 1 Research boundary and nutrient flows of different scales in dairy production system

1.3 计算方法

本研究采用 NUFER-animal 模型的方法[15]计算饲料投入、养分流动、养分利用效率和环境损失。

奶牛个体尺度饲料转化率(feed conservation rate, 简称 FCR)的计算公式如下：

$$\mathrm{FCR} = I_{\mathrm{lactating\ cow}} / O_{\mathrm{milk}} \tag{1}$$

式中：I 指投入量(input)，O 指输出量(output)，$I_{\mathrm{lactating\ cow}}$ 为泌乳牛饲料投入量(kg)，O_{milk} 为牛奶输出产量(kg)。

奶牛个体尺度、群体尺度和系统尺度的氮磷养分利用效率计算公式为：

$$N(P)UE_{\mathrm{animal}} = N(P)O_{\mathrm{LC}} / N(P)I_{\mathrm{LC}} \times 100\% \tag{2}$$

$$N(P)UE_{\mathrm{herd}} = N(P)O_{\mathrm{WGC}} / (N(P)I_{\mathrm{WGC}} \times 100\% \tag{3}$$

$$N(P)UE_{\mathrm{system}} = N(P)O_{\mathrm{WGC}} / \left[N(P)I_{\mathrm{fer}} + N(P)I_{\mathrm{FI}} + NI_{\mathrm{BNF}} + NI_{\mathrm{dep}}\right] \times 100\% \tag{4}$$

式中：$N(P)UE_{\mathrm{animal}}$、$N(P)UE_{\mathrm{herd}}$ 和 $N(P)UE_{\mathrm{system}}$ 是奶牛个体尺度、群体尺度和系统尺度氮或磷利用效率。$N(P)O_{\mathrm{LC}}$ 是指泌乳牛生长阶段的牛奶氮或磷输出；$N(P)I_{\mathrm{LC}}$ 是指泌乳牛生长阶段的饲料氮或磷输入；$N(P)O_{\mathrm{WGC}}$ 是指奶牛整个生长周期(whole growth cycle)的产品氮或磷输出，包括犊牛、育成牛、青年牛、泌乳牛和干乳牛产品氮或磷输出；$N(P)I_{\mathrm{WGC}}$ 是指奶牛整个生长周期的饲料氮或磷输入，包括犊牛、育

成牛、青年牛、泌乳牛和干乳牛饲料氮或磷输入; $N(P)I_{fer}$、$N(P)I_{FI}$、NI_{BNF} 和 NI_{dep} 分别是生产饲料的化肥氮或磷输入、饲料氮或磷进口(北京以外地区购买的饲料, 如鱼粉、豆粕、牧草等)、生物固氮输入和氮沉降输入。由于副产品投入属于系统内部循环, 因此在计算系统利用效率时不考虑副产物饲料投入。

根据物质流动平衡方法, 粪尿氮磷排泄量等于动物饲料投入氮和磷(I_{feed})与产品氮和磷(O_{animal})的差值。

$$N(P)_{manure} = N(P)I_{feed} - N(P)O_{animal} \tag{5}$$

粪便产生之后养分的去向包括 3 个部分: 气体排放、无序排放和销售。总环境损失包括 3 个部分: 农场门内气体排放、农场门内淋溶径流和通过农场门排放到水体。其中粪便销售比例和无序排放比例通过农场调研获得。气体排放(NH_3、N_2O 和 N_2)发生在粪尿管理的 3 个环节——圈舍、储存和处理过程。具体计算过程如下:

$$N(P)_{manure} = N_{GE} + N(P)_{GI} + N(P)_{LE} + N(P)_{SO} \tag{6}$$

式中: $N(P)_{manure}$ 是进入粪尿管理系统的粪尿养分总量, N_{GE} 是氮气体排放(gas emission)(包括圈舍、储存和处理过程的气体损失, 包括 NH_3、N_2O 和 N_2), $N(P)_{GI}$ 是氮或磷无序排放(direct discharge of manure), $N(P)_{LE}$ 是氮或磷淋溶排放(leaching), $N(P)_{SO}$ 是氮或磷粪尿销售(manure sold out), 粪尿销售比例从调研中获得。粪尿管理计算结果单位均为 kg(N)·kg(氮产品)$^{-1}$ 或 kg(P)·kg(磷产品)$^{-1}$。

$$N_{GE} = N_{GE_{housing}} + N_{GE_{storage}} + N_{GE_{treatment}} \tag{7}$$

$$N_{GE_{housing}} = N_{manure} \times Ef_{1i} \tag{8}$$

$$N_{GE_{storage}} = N_{storage} \times Ef_{2i} \tag{9}$$

$$N_{GE_{treatment}} = N_{treatment} \times Ef_{3i} \tag{10}$$

$$N(P)_{LE} = N(P)_{LE_{housing}} + N(P)_{LE_{storage}} + N(P)_{LE_{treatment}} \tag{11}$$

$$N(P)_{LE_{housing}} = N(P)_{manure} \times Ef_a \tag{12}$$

$$N(P)_{LE_{storage}} = N(P)_{storage} \times Ef_b \tag{13}$$

$$N(P)_{LE_{treatment}} = N(P)_{treatment} \times Ef_c \tag{14}$$

$$N(P)_{storage} = [N_{manure} - N_{GE_{housing}} - N(P)_{LE_{housing}} - N(P)_{DIS_{housing}}] \times Ef_{1j} \tag{15}$$

$$N(P)_{treatment} = [N_{manure} - N_{GE_{housing}} - N(P)_{LE_{housing}} - N(P)_{DIS_{housing}}] \times Ef_{2j} \tag{16}$$

$$N(P)_{DIS_{housing}} = N(P)_{manure} - N_{GE} - N(P)_{LE} - N(P)_{SO} \tag{17}$$

式中: $N_{GE_{housing}}$、$N_{GE_{storage}}$、$N_{GE_{treatment}}$ 分别是圈舍、储存和处理过程中的气体氮损失, $N(P)_{LE_{housing}}$、$N(P)_{LE_{storage}}$、$N(P)_{LE_{treatment}}$ 分别是圈舍、储存和处理过程中的氮或磷淋溶损失。$N(P)_{storage}$、$N(P)_{treatment}$ 分别是进入储存阶段和处理阶段的粪尿氮或磷数量。Ef_{1i} 是 i 种气体在圈舍中的排放系数; Ef_{2i} 是 i 种气体在处理过程中的排放系数。Ef_a、Ef_b、 Ef_c 分别是圈舍、储存和处理阶段的淋溶系数。EF_{1j}、EF_{2j} 分别是进入储存阶段和处理阶段的粪尿氮或磷的比例, 这个比例通过农场调研获得。

1.4　数据来源

本文数据来源包括调研数据、统计数据和文献数据 3 个部分, 具体如下:

1.4.1　调研数据

2012—2013 年期间, 本研究通过与农场人员面对面的问卷调研方式收集农场数据。调研样本的选择是基于畜牧业环境排放登记和畜牧部门工作人员的建议, 本次调研包括 28 个奶牛养殖场, 代表了北京 12%的规模化奶牛场(大于 200 头)。由于小规模养殖场经济效益低, 预计未来将逐渐消失, 因此本次调研不包括养殖规模小于 200 头的农场。调研内容包括农场输入、农场输出、生产管理和粪尿管理等, 具体调研内容见表 1。

1.4.2　统计数据

奶牛存栏数量数据来自北京市统计年鉴[11-12], 1998—2013 年的奶牛养殖规模比例变化数据来自于中国畜牧业统计年鉴[14,16-18]。1980—1997 年的奶牛养殖规模比例变化数据来源于 1999 年《中国畜牧业统计年鉴》中的北京市畜牧业规模化程度历史变化和专家经验估算得出[14]。粪尿管理的活动水平数据来自专家经验评估。

1.4.3　文献数据

1980—2005 年期间不同奶牛养殖体系饲料采食量引用柏兆海[5]的饲料组成, 根据畜禽能量需求和饲料资源量模拟的饲料结构。2013 年各奶牛养殖体系饲料配方和采食量、饲养天数及死亡率等信息则采用调研数据。饲料及奶牛产品氮磷养分含量采用 NUFER 模型参数[6]。粪尿在圈舍、储藏和处理过程中 N_2O 和 N_2 排放系数来自 NUFER 模型[6]。圈舍阶段的 NH_3 排放系数采用刘东[19]的总结, 储存和处理阶段的 NH_3 排放系数采用贾伟[20]和刘东[19]的总结(表 2)。回填的粪便进行高温干燥技术处理, 根据专家经验这里假设没有环境排放。

2　结果与分析

2.1　奶牛养殖"土壤-饲料-奶牛"生产系统氮流动特征及历史变化

1980年和2013年, 北京市奶牛养殖氮流动账户特征如图 2 所示。2013 年, 系统尺度氮素输入项中饲

表 1 北京市奶牛养殖基本信息调查结果

Table 1 Survey results of the basic information of dairy farms in Beijing

管理阶段 Management stage	调研内容 Survey content	调研结果 Survey result
农场输入 Farm input	饲料种类和数量 Feed type and quantity 饲养阶段天数 Feeding days	调研现状 Survey
圈舍 Housing	地板类型 Floor type	75.0%水泥地板 Cement floor (75.0%), 25.0%漏缝地板 Slatted floor (25.0%)
粪尿收集 Manure collection	收集频率 Collection frequency	20.0%一天两次 Two times a day (20.0%); 55.0%两天 1 次 One time two days (55.0%); 25.0%大于两天 1 次 More than two days (25.0%)
粪尿储存 Manure storage	储存方式 Storage type	0%地表覆盖 Aboveground with cover (0%); 11.0%地下覆盖 Underground with cover (11.0%); 25.0%地表无覆盖 Aboveground without cover (25.0%); 64.0%地下无覆盖 Underground without cover (64.0%)
粪尿处理 Manure treatment	处理方式 Treatment type	36.0%处理方式 1 Treatment 1 (36.0%); 11.0%处理方式 2 Treatment 2 (11.0%); 25.0%处理方式 3 Treatment 3 (25.0%); 28.0%处理方式 4 Treatment 4 (28.0%)
粪尿销售 Manure sales	销售数量 Sale number	调研现状 Survey
农场输出 Farm output	牛奶数量 Milk weight 淘汰牛质量 Eliminated dairy weight 淘汰牛数量 Eliminated dairy number	调研现状 Survey

处理方式 1：储存+沼气+无序排放；处理方式 2：储存+沼气+氧化塘+无序排放；处理方式 3：储存+沼气+氧化塘+回填+无序排放；处理方式 4：储存+堆肥+氧化塘+无序排放。Treatment 1: storage + biogas + discharge; Treatment 2: storage + biogas + oxidation pond + discharge; Treatments 3: storage + biogas + oxidation pond + landfilled + discharge; Treatment 4: storage + compost + oxidation pond + discharge.

表 2 规模化奶牛养殖场粪尿圈舍、储存和处理过程中的 NH_3、N_2O 和 N_2 排放因子

Table 2 Emission factors of NH_3, N_2O and N_2 during housing, storage and treatment for intensive dairy farm

处理过程 Treatment process	管理类型 Management type	NH_3-N/TN (%)	N_2O-N/TN (%)[6]	N_2/TN (%)[6]	氮/磷淋溶[6] N(P) leaching (%)
圈舍 Housing	水泥地面 Cement floor	23.0[19]	0.5	5.0	0.0
	垫料地板 Padding floor	12.5[19]	0.5	5.0	0.0
储存 Storage	地下无覆盖 Underground without cover	17.0[19-20]	0.5	5.0	0.0
	地下有覆盖 Underground with cover	14.0[19-20]	3.0	15.0	0.0
	地表无覆盖 Aboveground without cover	17.0[19-20]	0.5	5.0	1.0
	地表有覆盖 Aboveground with cover	15.0[19-20]	2.0	10.0	1.0
处理 Treatment	堆肥 Composting	41.8[19-20]	0.8	5.0	1.0
	工业沼气 Industrial biogas	8.3[19-20]	0.1	5.0	0.0
	氧化塘 Oxidation pond	41.7[19-20]	0.5	5.0	0.0

料投入包括进口饲料(北京以外地区输入，如青贮玉米、豆粕、牧草等)、副产物饲料和本地主产物饲料，输入量分别为 16 828 t、1 970 t 和 2 212 t。进口饲料是饲料氮的主要来源，占饲料氮输入量的 80.0%；其次是本地主产物饲料(玉米、大豆、牧草等)，占 11.0%；副产物饲料(麸皮、棉籽粕等)的输入量最小，为 9.0%。而 1980 年，进口饲料(北京以外地区输入)、副产物饲料和本地主产物饲料，输入量分别为 773 t、 331 t 和 327 t。进口饲料是饲料氮的主要来源，占饲料氮输入量的 54.0%；其次是副产物饲料和本地主产物饲料，均占 23.0%。1980—2013 年，进口饲料占总饲料投入的比例快速增加。

2013 年，系统尺度氮素输出项中牛奶和肉产品输出量为 3 821 t。系统尺度氮素输出项中粪尿去向包括粪尿损失、粪尿销售和粪尿还田，输出量分别为 13 284 t、3 464 t 和 441 t。粪尿损失是粪尿氮的主要去向，占粪尿输出量的 77.3%；其次是粪尿销售，占 20.2%；粪尿还田最小，为 2.6%。而 1980 年，粪尿损失、粪尿销售和粪尿还田，输出量分别为 617 t、14 t 和 593 t。粪尿损失是粪尿氮的主要去向，占粪尿输出量的 50.4%；其次是粪尿还田，占 48.4%；粪尿销售所占比例最小，为 1.1%。与 2013 年相比，粪尿销售和粪尿还田的比例发生了巨大变化。

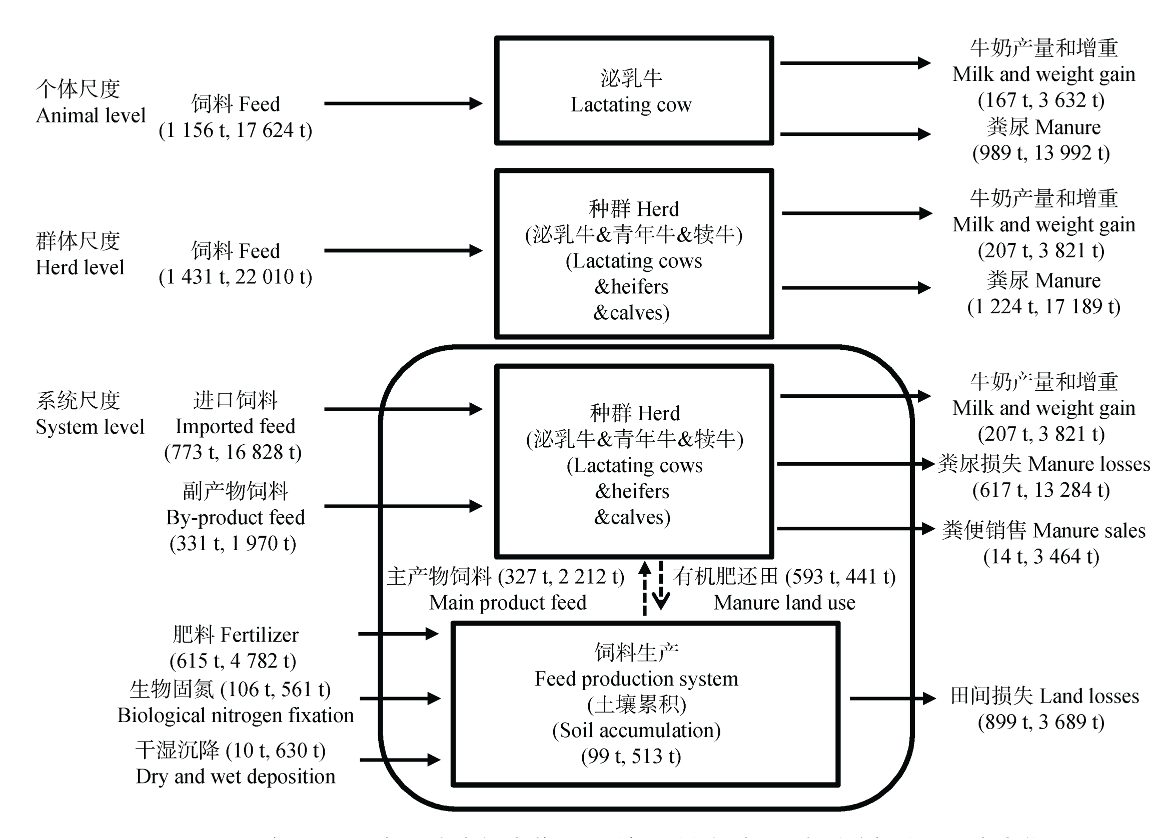


图 2　1980 年和 2013 年北京市奶牛养殖“土壤-饲料-奶牛”生产系统氮流动账户变化

Fig. 2　Changes of nitrogen flows in the “soil-feed-dairy” production system in Beijing in 1980 and 2013

括号中前一个数字代表 1980 年氮流动, 后面一个数字代表 2013 年氮流动。The first figures in the brackets represent the flow of nitrogen in 1980, the second numbers represent the flow of nitrogen in 2013.

1980 年和 2013 年, 北京市奶牛养殖氮流动账户历史变化如图 2 所示。2013 年, 泌乳牛个体尺度氮素输入项饲料投入量为 17 624 t, 比 1980 年增加 14.2 倍; 氮素输出项中奶产品质量和粪尿排泄量分别为 3 632 t 和 1.4×10^4 t, 分别是 1980 年的 21.7 倍和 14.1 倍。2013 年, 群体尺度氮素输入项饲料投入量为 22 010 t, 比 1980 年增加 14.3 倍; 氮素输出项中奶产品质量和粪尿排泄量分别为 3 821 t 和 17 189 t, 比 1980 年增加 17.5 倍和 13.2 倍。2013 年, 系统尺度进口饲料、主产物饲料和副产物饲料投入快速增加, 分别是 1980 年的 21.8 倍、7.7 倍和 5.8 倍。粪尿环境损失和粪尿销售量是 1980 年的 21.5 倍和 247.4 倍, 而粪尿还田数量比 1980 年下降 25.6%, 粪尿主要销售给周边种植户。2013 年, 系统尺度的作物生产环节中, 氮素输入项中化肥氮素投入量为 4 782 t, 比 1980 年增加 6.8 倍; 同时, 土壤氮素积累量是 1980 年的 5.2 倍。

2.2　“土壤-饲料-奶牛”生产系统磷流动特征及历史变化

1980 年和 2013 年, 北京市奶牛养殖磷流动账户特征如图 3 所示。2013 年, 系统尺度磷素输入项中饲料投入包括进口饲料、副产物饲料和本地主产物饲料, 输入量分别为 2 267 t、551 t 和 381 t。进口饲料是饲料磷的主要来源, 占饲料磷输入量的 70.8%; 其次是副产物饲料, 占 17.2%; 主产物饲料的输入量最小, 为 12.0%。而 1980 年, 进口饲料、副产物饲料和本地主产物饲料输入量分别为 140 t、87 t 和 61 t。进口饲料是饲料磷的主要来源, 占饲料磷输入量的 48.6%, 显著低于 2013 年; 其次是副产物饲料显著高于 2013 年, 占总输入量的 30.2%; 主产物饲料的输入量较 2013 年比例增加, 为 21.2%。2013 年, 系统尺度磷素输出项中粪尿去向包括粪尿损失、粪尿销售和粪尿还田, 输出量分别为 1 649 t、635 t 和 119 t。粪尿损失是粪尿磷的主要去向, 占粪尿磷输出量的 68.6%; 其次是粪尿销售, 占 26.4%; 粪尿还田最小, 为 5.0%。而 1980 年, 粪尿损失、粪尿销售和粪尿还田输出量分别为 55 t、3 t 和 184 t。粪尿还田是粪尿磷的主要去向, 占粪尿磷输出量的 76.0%; 其次是粪尿损失, 占 22.7%; 粪尿销售最小, 为 1.2%。2013 年相比 1980 年, 粪尿还田和粪尿销售的比例发生了巨大变化。

1980 年和 2013 年, 北京市奶牛养殖磷流动账户历史变化如图 3 所示。2013 年, 个体尺度磷素输入项饲料投入量为 2 536 t, 比 1980 年增加 9.9 倍; 磷

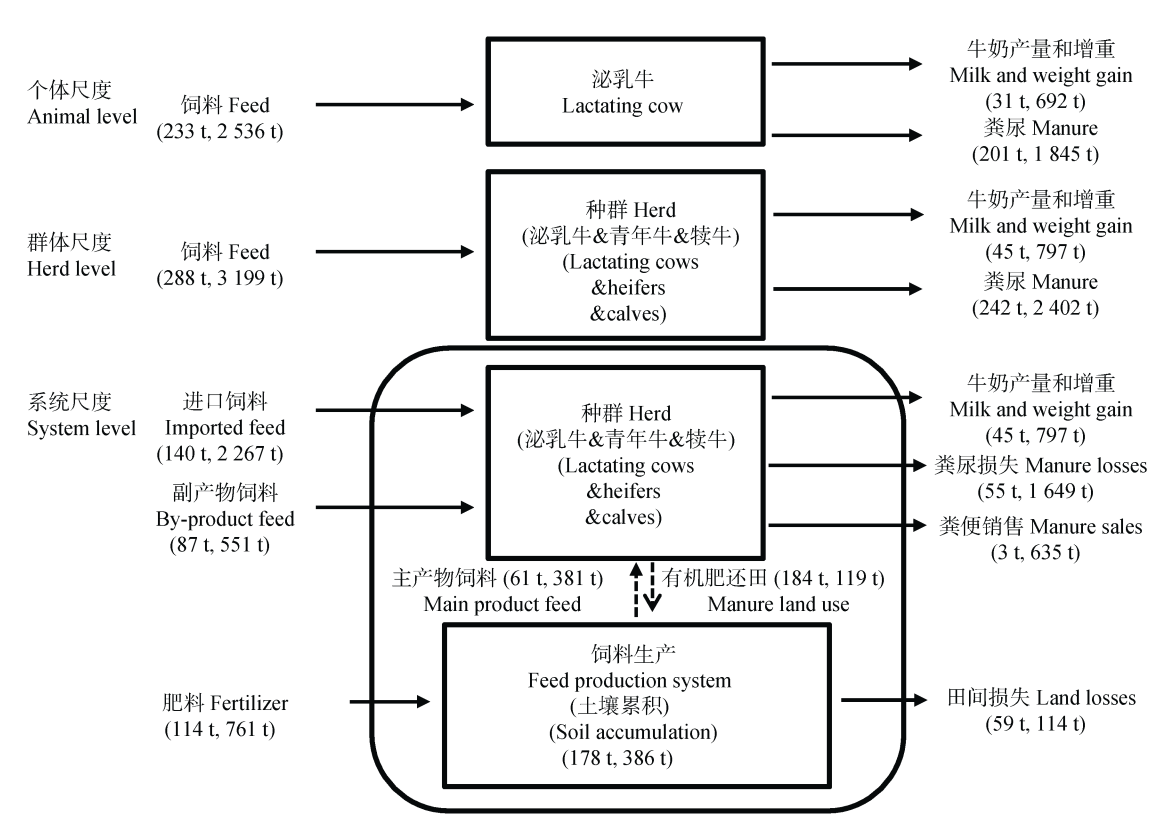


图 3　1980 年和 2013 年北京市奶牛养殖“土壤-饲料-奶牛”生产系统磷流动账户变化

Fig. 3　Changes of phosphorus flows in the “soil-feed-dairy” production system in Beijing in 1980 and 2013

括号中前一个数字代表 1980 年磷流动, 后面一个数字代表 2013 年磷流动。The first figures in the brackets represent the flow of phosphorus in 1980, the second numbers represent the flow of phosphorus in 2013.

素输出项中奶产品质量和粪尿排泄量分别为 692 t 和 1 845 t, 比 1980 年分别增加 21.3 倍和 8.2 倍。2013 年, 群体尺度磷素输入项饲料投入量为 3 199 t, 比 1980 年增加 10.1 倍; 磷素输出项中奶产品质量和粪尿排泄量分别为 797 t 和 2 402 t, 比 1980 年分别增加 16.7 倍和 8.9 倍。2013 年, 系统尺度磷素输入项中进口饲料、主产物饲料和副产物饲料投入量比 1980 年分别增加 15.2 倍、5.2 倍和 5.3 倍。2013 年, 系统尺度磷素输出项中粪尿环境损失和销售量比 1980 年分别上升 29.0 倍和 210.7 倍, 而粪尿还田数量比 1980 年下降 35.0%。2013 年, 系统尺度的作物生产环节中, 磷素输入项中人为化肥养分投入量为 761 t, 比 1980 年增加 5.7 倍; 土壤磷素积累量比 1980 年增加 1.2 倍。

2.3　“土壤-饲料-奶牛”生产系统氮磷环境排放历史变化

1980—2013 年, 北京市奶牛养殖体系氮、磷损失变化如表 3 所示。氮损失包括 NH_3、N_2O、N_2 挥发、无序排放、淋溶和径流; 磷损失包括无序排放、淋溶和径流。2013 年, 生产 1 kg 牛奶氮产生 4.9 kg 氮损失, 与 1980 年的 9.1 kg 相比降低 46.2%。而生产 1 kg 牛奶磷带来 2.7 kg 磷损失, 比 1980 年的 3.8 kg 降低 29.0%。然而, 在过去 30 年间, 奶牛养殖氮素环境损失降低趋势分为 3 个阶段: 1985 年以前环境损失出现上升趋势, 1985 年后快速降低之后保持平缓, 2000 年后又出现一次快速降低之后保持平缓。随着奶牛养殖模式从家庭和传统模式向集约化模式转变, 2013 年, 无序排放损失量为 2.6 kg(N)·kg(氮产品)$^{-1}$, 比 1980 年增加 12 倍; 而淋溶和径流损失量为 0.3 kg(N)·kg(氮产品)$^{-1}$, 比 1980 年降低 88.0%。磷素损失各组分的变化趋势与氮相似。

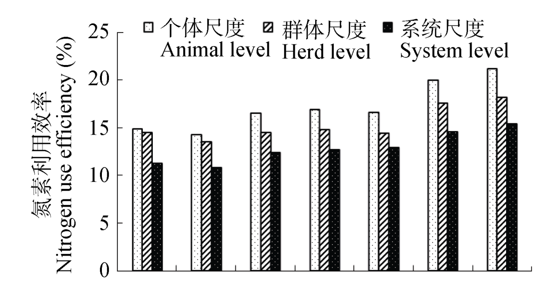
2.4　“土壤-饲料-奶牛”生产系统养分利用效率历史变化

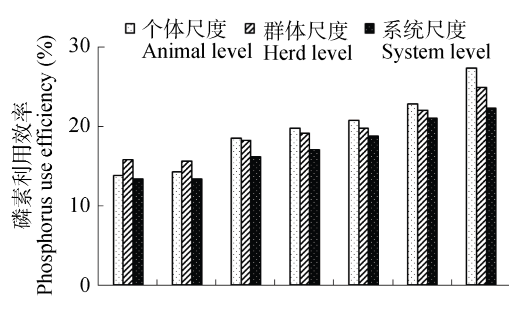
1980 年至 2013 年, 北京市奶牛养殖不同尺度养分利用效率和饲料转化率历史变化如图 4 所示。2013 年, 泌乳牛个体尺度氮素养分利用效率(nitrogen use efficiency, NUE)为 21.2%, 群体尺度 NUE 为 18.2%, 系统尺度 NUE 为 15.4%。泌乳牛个体尺度和群体尺度平均 NUE 1985 年前呈下降趋势, 1985 年到 2013 年呈上升趋势。1980 年, 系统尺度 NUE 低于群体和个体尺度, 而随着养殖模式逐渐向规模化转变, 系统尺度 NUE 一直呈上升趋势。2013 年, 泌乳牛个体尺度、群体尺度和系统尺度磷素养分利用效率(phosphorus use efficiency, PUE)为 27.3%、24.9%和

表 3　1980 年至 2013 年生产 1 kg 牛奶氮磷带来的氮磷损失变化

Table 3　Changes in mean nitrogen and phosphorus losses associated with the production of 1 kg nitrogen and phosphorus in milk from 1980 to 2013

项目 Item	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2013
	氮损失 N losses [kg(N)·kg^{-1}(milk N)]						
氨气 NH_3	3.2	3.2	2.1	2.0	1.6	1.3	1.2
氧化亚氮 N_2O	0.1	0.1	0.07	0.06	0.05	0.04	0.04
氮气 N_2	3.0	2.8	1.4	1.3	0.9	0.7	0.7
淋溶和径流 Leaching and runoff	2.5	2.2	1.1	0.9	0.5	0.4	0.3
无序排放 Discharge	0.2	1.1	2.3	2.6	3.2	2.8	2.6
总损失 Total losses	9.1	9.3	7.1	6.8	6.3	5.3	4.9
	磷损失 P losses [kg(P)·kg^{-1}(milk P)]						
淋溶和径流 Leaching and runoff	3.5	3.0	1.3	1.1	0.5	0.4	0.3
无序排放 Discharge	0.3	1.2	2.5	2.6	3.1	2.7	2.4
总损失 Total losses	3.8	4.2	3.8	3.7	3.7	3.1	2.7





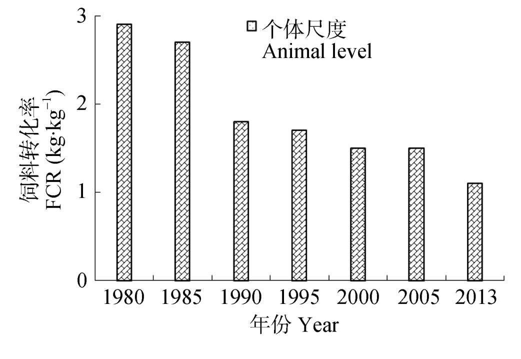


图 4　1980 年至 2013 年奶牛养殖个体尺度、群体尺度和系统尺度氮和磷养分利用效率变化

Fig. 4　Changes in nitrogen and phosphorus use efficiencies of dairy production at animal, herd, and system levels from 1980 to 2013

22.3%, 比 1980 年分别增加 97.8%、57.6%和 67.3%。个体尺度、群体尺度和系统尺度 PUE 从 1980 年到 2013 年呈上升趋势。2013 年, 泌乳牛个体尺度饲料转化率(feed conversion rate, FCR)为 1.1 kg·kg^{-1}, 比 1980 年降低 62.0%。

2.5　“土壤-饲料-奶牛”生产系统氮磷环境排放空间分布

1980 年和 2013 年, 北京市奶牛养殖氮、磷损失时空变异如图 5 所示。与 1980 年相比, 2013 年北京市奶牛养殖环境氮损失在城郊区域迅速增加, 而在城市中心区域迅速减少。2013 年, 城市中心区域(朝阳、丰台、石景山)环境损失量减为 0, 而城郊地区环境损失量快速增加。2013 年, 奶牛养殖怀柔、顺义、密云和平谷单位耕地面积环境氮损失量为 354.3 kg·hm^{-2}、69.8 kg·hm^{-2}、94.4 kg·hm^{-2}和 27.9 kg·hm^{-2}, 比 1980 年分别增加 1 896 倍、1 308 倍、758 倍和 636 倍。2013 年, 怀柔、顺义、密云和平谷单位面积环境磷素损失量为 34.2 kg·hm^{-2}、6.7 kg·hm^{-2}、9.1 kg·hm^{-2}和 2.0 kg·hm^{-2}, 比 1980 年分别增加 2 454 倍、1 688 倍、977 倍和 601 倍。各区域环境损失与各区域奶牛养殖数量和养殖模式比例密切相关。

3　讨论与结论

3.1　养分利用效率和环境损失变化

1980 年至 2013 年, 北京市奶牛养殖个体尺度、群体尺度和系统尺度氮素利用效率呈现“先减后增”趋势, 即 1985 年前降低, 而 1985 年后出现第一次快速增加, 2000 年再次出现第 2 次快速增加。个体尺度、群体尺度和系统尺度磷素利用效率均不断增加。与此同时, 生产 1 kg 氮磷产品带来的氮和磷素损失也呈现先增后减的趋势。产生这一系列变化的原因与奶牛养殖数量增加、养殖结构变化和社会对环境问题的重视程度提高有关。20 世纪 70 年代末期之前, 80%的奶牛在国有农场饲养, 在这之后, 70%奶

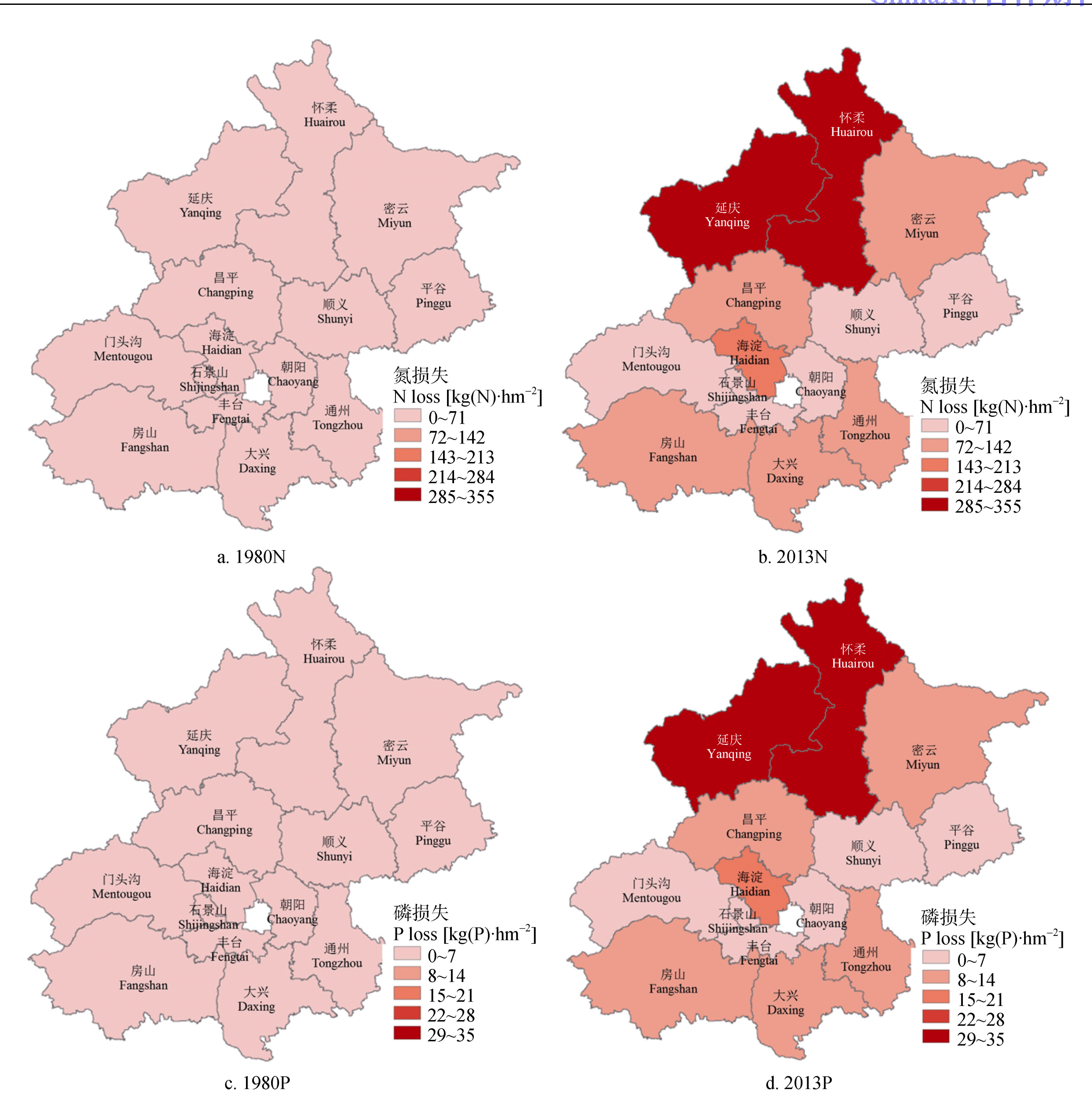


图 5　北京市各区县奶牛养殖 1980 年和 2013 年氮损失和磷损失

Fig. 5　Comparing of nitrogen losses and phosphorus losses among different counties in Beijing in 1980 and 2013

牛是由分散的农户养殖[21]。由于农村农民自身经济条件有限，许多农户养殖奶牛只是作为增加收入的来源之一，不是把它作为一个专门的职业。一般饲养在房前屋后，简单添加一些粗饲料，奶牛饲养管理水平很低。因此 1985 年前的阶段，虽然奶牛养殖数量不断上升，但是奶牛养殖养分利用效率出现了轻微下降趋势。1986 年逐渐开始规模化奶牛场的建设[14], 20 世纪 90 年代末，随着“菜篮子”工程的实施，北京市率先发展奶牛规模化、集约化养殖，示范奶牛场建设进入稳步发展阶段[22]，尤其 2000 年以来，奶牛养殖业快速发展，存栏量迅速增加，较 1985 年增加了 2.0 倍[23-24]。系统尺度养分利用效率不断增长，这与生猪养殖的趋势不同，其主要原因是北京奶牛养殖单产量的增加量远远大于饲料的投入增加量。2007 年以来，根据《国务院关于促进奶业持续健康发展的意见》，北京市以规模养殖基地建设提升工程为着力点，推进奶牛规模化和标准化饲养。同时，环境氮损失在 2000 年出现第 2 次下降还与 2000 年起国家环保部和农业部等对畜禽养殖的产地、污染物排放、污染物防治和无害化处理等发布的许多标准、规范、导则和政策有关[25-30]。

2013 年，北京奶牛养殖个体尺度氮素利用效率为 20.5%，高于中国 2010 年氮素利用效率的 17%[15]，低于欧盟 2009 年的 26%[31]。其主要是因为北京奶牛养殖饲料粗蛋白含量为 16.6%，大大高于美国的平均值(13.6%)[32]和欧盟的平均值(15.8%)[33]。这是因

为北京饲料配方中蛋白质含量较高的饲料比例较大，如豆粕(22%)、麸皮(9%)。北京奶牛养殖个体尺度磷利用效率为 25.2%，高于全国的 17%[15]。

3.2 北京市不同区县环境排放量的差异

随着城市化的不断发展，北京市奶牛养殖业的持续发展受到资源和空间的刚性约束越来越凸显，持续稳定发展的难度加大，统筹安排奶牛养殖规模化、集约化生产成为“十三五”期间的迫切要求。过去 30 年，北京城区和近郊区域由畜禽养殖导致的环境损失迅速减少，而远郊区域的环境损失快速增加。从畜禽种类的分布来看，养殖分布基本达到“三带”、“多品种”养殖产业布局[34]，已经形成了以房山、大兴、通州、顺义、昌平、密云和延庆为主的牛养殖带。这与北京市奶牛养殖环境排放分布情况基本吻合。与 1980 年相比较, 2013 年郊区奶牛养殖单位耕地面积的环境排放增加巨大。其原因主要包括养殖数量在郊区各区县的急剧增加、规模化养殖比例的快速变化和耕地数量的减少。以怀柔为例，1980 年奶牛养殖数量为 30 头, 2013 年为 19 438 头，养殖数量较 1980 年增加了 647 倍。顺义、密云、平谷 2013 年养殖数量分别较 1980 年增加 565 倍、627 倍和 99 倍。产生这样分布的原因包括两部分：自然因素和人为因素。首先，北京地势西北和东北部高，群山环绕，为山区地带。这部分区域可以为奶牛养殖提供更多的养殖空间和粗饲料来源。因此，奶牛养殖带来的环境排放西北和东北部显著大于西南和东南部。另一主要原因来自于城市化发展和北京政府区域规划。城市功能区域划分带来了各个区域的奶牛养殖数量和养殖结构变化，从而带来了环境损失的变化[35]。北京市划分为 4 种功能区：首都功能核心区、城市功能拓展区、城市发展新区和生态涵养发展区[35]。根据各个功能区的职责分工，城市发展新区功能为发展先进制造业和现代农业，生态涵养发展区为生态屏障和水源保护地，重点发展生态农业[35]。因此，畜禽养殖带来的环境损失在这两个发展区快速增加。与生猪养殖环境排放空间分布不同的是，奶牛养殖环境排放增加更为显著地集中在生态涵养发展区，包括怀柔区、密云县和平谷区，其次增加集中在城市发展新区，包括顺义区、大兴区。因为奶牛养殖所需的土地资源要求大于生猪养殖，所有更多地集中在占地面积更大的山区和丘陵地带。

3.3 “土壤-饲料-奶牛”生产系统氮磷优化管理策略

北京奶业属于典型的都市型奶业，随着北京都市化进程的加快，农用土地面积不断减少，北京奶业不能像其他资源型城市一样走大规模养殖道路。再加上一些区县功能规划的转变，使原有一些区县的奶牛养殖面临场地和饲料供应的困难。调整北京市奶牛养殖由数量发展型向质量提高型转变将成为北京市奶业发展的重中之重。2010 年，中型农场奶牛单产为 5 127 kg·a^{-1}，大型农场奶牛单产为 7 995 kg·a^{-1}，牛奶产量超过消费量 20.4 万 t[36]。如果未来达到生产和消费的平衡，在保持现有最高生产水平的情况下，可以减少 25 527 头奶牛养殖数量。因此，北京要通过提高奶牛单产、提高土地资源效率的途径提高养分利用效率，弥补自然资源不足所带来的发展困境。

推进适度规模养殖和农牧结合模式。考虑到环境的消纳能力、青粗饲料来源和成本以及疾病防控等方面的问题[37]，适度控制规模化程度、精准饲料投入和提高农牧结合程度是十分必要的。引导农民逐步建立奶牛养殖小区和合作社，在养殖小区和合作社的基础上实现奶牛养殖的适度规模化和规范化发展[38]。减少 2%的蛋白饲料投入量(从现有水平的 16.6%降低到欧美平均水平的 14.7%)，从而减少氮气体损失的同时降低经济成本。政府积极推行“种养结合”的养殖模式，实现“零污染一体化”经营[37-38]。奶牛养殖业适度外移。“十二五”期间，北京市提出打造“种业之都”的目标，启动实施北京市种业发展规划[39]。利用首都的经济、技术、人才集中的优势，大力发展种业，提高奶牛品种水平。同时，借助天津市与河北省的自然资源优势，达到技术与自然资源的有效结合。

3.4 结论

本文采用 NUFER-animal 模型详细分析了 30 年北京市“土壤-饲料-奶牛”生产系统氮磷流动和时空变化特征，对该系统氮磷养分利用率和环境损失进行了定量化研究。

北京市“土壤-饲料-奶牛”生产系统氮磷流动特征发生了很大变化。饲料氮磷输入来源仍然以进口饲料为主，进口饲料所占比例随时间不断增加，而副产物饲料和本地主产物饲料比例不断下降，且副产物饲料比较下降大于本地主产物饲料。粪尿输出去向从 1980 年的以农户内循环为主转变为 2013 年的以粪尿销售给果蔬种植户为主。输入和输出项的比例发生了巨大变化。

北京市奶牛养殖个体尺度、群体尺度和系统尺度氮利用效率呈现“先减后增”趋势，即 1985 年前不断降低，而 1985 年后又逐渐增加。个体尺度、群体尺度和系统尺度磷利用效率均不断增加。氮总损失

从1980年的1 516 t增加到2013年的16 973 t，增加10.2倍；磷总损失从114 t增加到1 763 t，增加14.5倍。生产1 kg氮磷产品带来的氮和磷损失均表现出先增后减的趋势。因此，采用集约化模式中的精准喂养技术、粪便管理技术并同时进行农牧生产体系的结合等，是提高奶牛养殖可持续发展的必要措施。

参考文献 References

[1] Sutton M A, Howard C M, Howard C M, et al. The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2011
[2] Cambra-López M, Aarnink A J A, Zhao Y, et al. Airborne particulate matter from livestock production systems: A review of an air pollution problem[J]. Environmental Pollution, 2010, 158(1): 1–17
[3] Oenema O, Oudendag D, Velthof G L. Nutrient losses from manure management in the European Union[J]. Livestock Science, 2007, 112(3): 261–272
[4] Steinfield H, Gerber P, Wassenaar T, et al. Livestock's Long Shadow: Environmental Issues and Options[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006
[5] 柏兆海. 我国主要畜禽养殖体系资源需求、氮磷利用和损失研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015
Bai Z H. The resources requirement, nitrogen and phosphorus use and losses in the main livestock production system in China[D]. Beijing: China Agriculture University, 2015
[6] Ma L, Ma W Q, Velthof G L, et al. Modelling nutrient flows in the food chain of China[J]. Journal of Environment Quality, 2010, 39(4): 1279–1289
[7] Wang F H, Dou Z X, Ma L, et al. Nitrogen mass flow in China's animal production system and environmental implications[J]. Journal of Environmental Quality, 2010, 39(5): 1537–1544
[8] Wang F, Sim J T, Ma L, et al. The phosphorus footprint of China's food chain: Implications for food security, natural resource management, and environmental quality[J]. Journal of Environmental Quality, 2011, 40(4): 1081–1089
[9] Ma L, Velthof G L, Wang F H, et al. Nitrogen and phosphorus use efficiencies and losses in the food chain in China at regional scales in 1980 and 2005[J]. Science of the Total Environment, 2012, 434: 51–61
[10] 北京市农村工作委员会, 北京市农业局, 北京市园林绿化局, 等. 北京种业发展规划(2010—2015年)[R]. 北京, 2010
The Rural Work Committee of Beijing City, Beijing Municipal Bureau Agriculture, Beijing City Gardens Bureau, et al. Beijing Seed Industry Development Plan (2010–2015)[R]. Beijing, 2010
[11] 北京市统计局. 北京市统计年鉴2013[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014
Beijing Municipal Bureau of Statistics. Beijing Statistical Yearbook 2013[M]. Beijing: China Statistics Press, 2014
[12] 北京市统计局. 北京市统计年鉴1980[M]. 北京: 中国统计出版社, 1981
Beijing Municipal Bureau of Statistics. Beijing Statistical Yearbook 1980[M]. Beijing: China Statistics Press, 1981
[13] 农业部. 中国畜牧业年鉴2013[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013
Ministry of Agriculture. China Livestock Yearbook 2013[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2013
[14] 农业部. 中国畜牧业年鉴1999[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
Ministry of Agriculture. China Livestock Yearbook 1999[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000
[15] Bai Z H, Ma L, Oenema O, et al. Nitrogen and phosphorus use efficiencies in dairy production in China[J]. Journal of Environmental Quality, 2013, 42(4): 990–1001
[16] 农业部. 中国畜牧业年鉴2011[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011
Ministry of Agriculture. China Livestock Yearbook 2011[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2011
[17] 农业部. 中国畜牧业年鉴2006[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006
Ministry of Agriculture. China Livestock Yearbook 2006[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006
[18] 农业部. 中国畜牧业年鉴2001[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001
Ministry of Agriculture. China Livestock Yearbook 2001[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001
[19] 刘东. 中国猪和奶牛粪尿氨(NH_3)挥发的评价研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2007
Liu D. Evaluation of NH_3 emission from pig and dairy cow manure in China[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2007
[20] 贾伟. 我国粪肥养分资源现状及其合理利用分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2014
Jia W. Studies on the evaluation of nutrient resources derived from manure and optimized utilization in arable land of China[D]. Beijing: China Agriculture University, 2014
[21] 董晓霞, 丁凡琳. 北京市奶牛养殖业现状及未来发展趋势[J]. 农业展望, 2015(4): 45–49
Dong X X, Ding F L. Status quo and development trend of dairy breeding industry in Beijing[J]. Agricultural Outlook, 2015(4): 45–49
[22] 董晓霞. 奶牛规模化养殖与环境保护[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2014
Dong X X. Dairy Farming and Environmental Protection[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2014
[23] 北京市统计局. 北京市统计年鉴2001[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001
Beijing Municipal Bureau of Statistics. Beijing Statistical Yearbook 2001[M]. Beijing: China Statistics Press, 2001
[24] 北京市统计局. 北京市统计年鉴1986[M]. 北京: 中国统计出版社, 1986
Beijing Municipal Bureau of Statistics. Beijing Statistical Yearbook 1986[M]. Beijing: China Statistics Press, 1986
[25] 国家环境保护总局. GB 18596—2001 畜禽养殖污染物排放

标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001
Ministry of Environmental Protection of China. GB 18596—2001 Discharge Standard of Pollutants for Livestock and Poultry Breeding[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2001
[26] 国家环境保护总局. GB 7959—1987 粪便无害化卫生标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1987
Ministry of Environmental Protection of China. GB 7959–1987 Sanitary Standard for the Non-hazardous Treatment of Night Soil[S]. Beijing: China Standard Press, 1987
[27] 中华人民共和国农业部. NY/T 1167—2006 畜禽场环境质量及卫生控制规范[S]. 北京: 中国农业出版社, 2006
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY/T 1167—2006 Environment Quality and Sanitary Control Requirement for the Livestock and Poultry Farms[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2006
[28] 国家环境保护总局. GB/T 17824.4—1999 中、小型集约化养猪场环境参数及环境管理[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000
Ministry of Environmental Protection of China. GB/T 17824.4—1999 Environmental Parameters and Environmental Management in Middle and Small Intensive Pig Farms[S]. Beijing: China Standard Press, 2000
[29] 国家环境保护总局. HJ/T 81–2001 畜禽养殖业污染防治技术规范[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001
Ministry of Environmental Protection of China. HJ/T 81—2001 Technical Standard of Preventing Pollution for Livestock and Poultry Breeding[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2001
[30] 农业部. 中华人民共和国畜牧法[S]. 北京: 中国法制出版社, 2001
Ministry of Agriculture. Animal Husbandry Law of China[S]. Beijing: China Law Press, 2001
[31] Oenema O, Oudendag D, Velthof G L. Nutrient losses from manure management in the European Union[J]. Livestock Science, 2007, 112: 261–272
[32] Powell J M, Gourley C J P, Rotz C A, et al. Nitrogen use efficiency: A potential performance indicator and policy tool for dairy farms[J]. Environmental Science Policy, 2010, 13: 217–228
[33] Oenema J, van Keulen H, Schils R L M, et al. Participatory farm management adaptations to reduce environmental impact on commercial pilot dairy farms in the Netherlands[J]. NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences, 2011, 58: 39–48
[34] 李帷, 李艳霞, 杨明, 等. 北京市畜禽养殖的空间分布特征及其粪便耕地施用的可达性[J]. 自然资源学报, 2010, 25(5): 746–755
Li W, Li Y X, Yang M, et al. Spatial distribution of livestock and poultry production and land application accessibility of animal manure in Beijing[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(5): 746–755
[35] 北京市民政局. 北京市行政区划[M]. 北京: 中国社会出版社, 2003
Beijing Affairs Bureau. Administrative Division of Beijing City[M]. Beijing: China Society Press, 2003
[36] 国家发展和改革委员会价格司. 全国农产品成本收益资料汇编[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011
Price Department of National Development and Reform Commission. National Agricultural Product Cost and Revenue Information[M]. Beijing: China Statistics Press, 2011
[37] 王泽, 罗小红, 何忠伟, 等. 北京奶业可持续发展研究[J]. 中国食物与营养, 2015, 21(6): 21–24
Wang Z, Luo X H, He Z W, et al. Study on sustainable development of dairy industry in Beijing City[J]. Food and Nutrition in China, 2015, 21(6): 21–24
[38] 杨利, 杨宇泽, 刘芳. 北京市规模化奶牛养殖场成本效益研究[J]. 农业展望, 2013, 9(8): 48–53
Yang L, Yang Y Z, Liu F. Cost-effectiveness analysis of scale dairy farms in Beijing[J]. Agricultural Outlook, 2013, 9(8): 48–53
[39] 冯静静, 杨静. 从北京市资源环境限制因素看奶牛养殖业的发展前景[J]. 农业展望, 2011, 7(2): 28–32
Feng J J, Yang J. Development prospect of dairy industry from the perspective of resources and environment restriction factors in Beijing[J]. Agricultural Outlook, 2011, 7(2): 28–32